

Uwarunkowania cyrkulacyjne konwekcji w Karpatach Zachodnich

Influence of atmospheric circulation on convection in the Western Carpathians

Szymon Poreba

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

e-mail: szymon.poreba@doctoral.uj.edu.pl

Zarys treści: W pracy zawarto wyniki badań zależności termodynamicznego wskaźnika konwekcji CAPE od cyrkulacji atmosferycznej w Karpatach Zachodnich. Wskaźnik ten jest jednym z najczęściej stosowanych w ocenie intensywności konwekcji. Wykorzystano dane z reanaliz meteorologicznych bazy ECMWF oraz radiosondaży z 13-lecia 2000–2012. Zastosowano dwie klasyfikacje typów cyrkulacji atmosferycznej: Grosswetterlagen oraz T. Niedźwiedzia. W badanym okresie, w miesiącach letnich wskaźnik CAPE nad rozpatrywaną domeną wynosił średnio od 160 J/kg w południowo-zachodniej części obszaru, do ponad 230 J/kg w jego wschodniej części. Najwyższa wartość przekroczyła 3700 J/kg. Zgodnie z klasyfikacją Grosswetterlagen najwyższe średnie wartości wskaźnika CAPE w lecie występowały podczas cyklonalnej cyrkulacji powietrza z adwekcją powietrza z południa (SZ), natomiast według klasyfikacji T. Niedźwiedzia – podczas wschodniego cyklonalnego typu cyrkulacji atmosferycznej (Ec).

Słowa kluczowe: cyrkulacja atmosferyczna, konwekcja, wskaźnik CAPE, sondaże aerologiczne

Abstract: The work presents influence of atmospheric circulation on CAPE values over the Western Carpathians. CAPE index is one of the most commonly used convection indicators. The study was based on reanalysis data from ECMWF database, aerological sounding's

results and two atmospheric circulation classifications: Grosswetterlagen and the one by T. Niedźwiedź. The study period included summer months from 13 years: 2000 to 2012. Average CAPE value reached 160 J/kg in south western part of the research area, and over 230 J/kg in the eastern part. Maximum CAPE value in the domain was almost 3700 J/kg. The biggest average CAPE values occurred during cyclonic synoptic situation with air advection from south (SZ) according to Grosswetterlagen types, and cyclonic synoptic situation with air advection from the east (Ec) according to T. Niedźwiedź classification.

Key words: atmospheric circulation, convection, CAPE, soundings

Wprowadzenie

Konwekcja jest procesem, który bardzo dynamicznie zmienia się w czasie i przestrzeni. Jest skutkiem zróżnicowania termicznego powierzchni ziemi oraz atmosfery. Niejednorodność termiczna prowadzi do ruchów powietrza dążących do wymiany ciepła w przestrzeni aż do momentu osiągnięcia równowagi. Taki ruch powietrza może być horyzontalny i wielkoskalowy, znany jako adwekcja, oraz wertykalny o znacznie bardziej lokalnym charakterze, czyli konwekcja. Zgodnie ze *Słownikiem meteorologicznym* (Niedźwiedź 2003), konwekcją nazywamy więc wszystkie pionowe ruchy powietrza. Wyróżnia się konwekcję swobodną (termiczną), która wywołana jest siłami wyporu oraz konwekcję wymuszoną (dynamiczną), przy której największy wpływ mają siły dynamiczne. Obydwa wymienione typy konwekcji mogą występować jednocześnie. Konwekcja swobodna pojawia się podczas silnej insolacji powodującej nagrzanie się powierzchni czynnej i wzniesienie się powietrza. Konwekcja dynamiczna natomiast jest charakterystyczna dla frontów atmosferycznych lub wymuszania orograficznego.

Wiele elementów i zjawisk meteorologicznych, a zwłaszcza burze, powodzie, trąby powietrze oraz wichury, są zależne od siły konwekcji. Zjawisko to jest często rozpatrywane przede wszystkim z uwagi na jego wpływ na rozwój opadów i burz. Ponadto powoduje ono zanikanie mgieł, powstawanie chmur, a także różnicuje dyspersję zanieczyszczeń (Rozbicka i in. 2009). Wskaźniki konwekcji pomagają w prognozowaniu intensywności i miejsca wystąpienia zjawisk konwekcyjnych. Niektóre z nich stosowane są od przeszło 60 lat (Blanchard 1998). Większość termodynamicznych wskaźników konwekcji bazuje na zawartości pary wodnej w dolnej troposferze, temperaturze powietrza oraz pionowym gradiencie temperatury (Peppier 1988). Wśród nich znajduje się termodynamiczny wskaźnik CAPE

(ang. *Convective Available Potential Energy*), określający ilość energii potencjalnie dostępnej w procesie konwekcji. W poniższych rozważaniach wskaźnik ten został wykorzystany do oceny występowania warunków cyrkulacyjnych sprzyjających konwekcji nad Karpatami Zachodnimi.

Cel pracy i stan badań

Celem pracy było określenie wpływu cyrkulacji atmosferycznej na wielkość wskaźnika konwekcji CAPE oraz scharakteryzowanie rozkładu czasowego i przestrzennego tego wskaźnika w lecie nad obszarem Karpat Zachodnich i ich przedpolem. Badania dotyczą 13-lecia 2000–2012 i zostały zrealizowane na podstawie codziennych danych z godziny 12 UTC o wielkości wskaźnika konwekcji CAPE.

W literaturze tematyka konwekcji oraz jej zależności od cyrkulacji atmosferycznej i wpływu na inne elementy meteorologiczne została podjęta w szerokim i kompleksowym zakresie przez autorów takich, jak: Barry i Perry (1973), Barry i Chorley (1998) oraz Barry i Carleton (2001). Publikacje te stanowią ponadto wstęp do wszelkich badań z meteorologii i klimatologii synoptycznej.

Najgwałtowniejszym efektem procesu konwekcji są burze. Zależność ich występowania od cyrkulacji atmosferycznej w Polsce badana była m.in. przez Kolendowicza (1996, 2006, 2007), Bielec (2000), Bielec-Bąkowską (2002) oraz Grabowską (2011). Badania te opierały się głównie na danych dostarczanych przez stacje synoptyczne. Ustrnul i Czekierda (2009) zbadali uwarunkowania cyrkulacyjne dni, w których burze występowały niemal w całej Polsce (na przynajmniej 80% stacji synoptycznych). Stosunkowo wiele publikacji dotyczy cyrkulacyjnych uwarunkowań opadów gradu silnie związanych z procesami konwekcyjnymi. Przykładem są publikacje Bielec-Bąkowskiej (2013) oraz Suwały (2014). Coraz częściej w polskiej literaturze pojawiają się publikacje na temat jeszcze groźniejszych zjawisk konwekcyjnych, jak tornado lub derecho. Opracowaniami takimi zajmowali się Bełtot i in. (2008), Popławska i Grabowska (2013) a także Celiński-Mysław i Matuszko (2014). W tych publikacjach znajdują się informacje na temat wskaźników konwekcji, metody ich obliczania oraz wartości wskaźników podczas występowania gwałtownych zjawisk konwekcyjnych. Natomiast badaniami nad ich zróżnicowaniem czasowym i przestrzennym oraz uwarunkowaniami

cyrkulacyjnymi zajmowali się w szczególności: Bąkowski (2005), Siedlecki i Rzepa (2008), Malinowska (2011), Siedlecki (2011), Walawender i in. (2015).

Wydaje się, że temat rozkładu i uwarunkowań cyrkulacyjnych wskaźników konwekcji omówiono najlepiej w literaturze anglojęzycznej. Brooks i in. (2003), Brooks i in. (2007) oraz Brooks (2013) badali rozkład gwałtownych burz i wskaźników konwekcji, również z użyciem reanaliz meteorologicznych. Grünwald i Brooks (2011) porównali wartości wskaźników konwekcji uzyskanych przez pomiar aerologiczny z siłą tornad w Europie. Delden (2001) opracował szczegółowe mapy synoptyczne uwzględniające rozkład m.in. potencjalnej niestabilności atmosfery podczas występowania burz w Europie Zachodniej. Holley i in. (2014) badali rozkład wskaźnika CAPE w Wielkiej Brytanii z użyciem reanaliz.

Obszar badań

Obszarem badań objęto Karpaty Zachodnie i ich przedpole. Jego granice stanowią równoleżniki 48°N i 50°N oraz południki 18°E i 22°E. W tej domenie znajdują się głównie obszary górskie i wyżynne, jedynie na południu obszaru częściowo nizinne. Region ten charakteryzuje się znaczną wysokością bezwzględną sięgającą ponad 2600 m n.p.m. w środkowej części oraz dużymi deniwelacjami terenu. Czynniki te mają wpływ na klimat tego obszaru, który jest silnie zróżnicowany. Występują tu piętra klimatyczne oraz specyficzne warunki meteorologiczne w dolinach i na wierzchołkach. Wiele elementów meteorologicznych jest tu zróżnicowanych w zależności od wysokości bezwzględnej terenu jak i ekspozycji. Zróżnicowana ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Karpat oraz różna pojemność cieplna obszaru (zależna m.in. od rodzaju pokrycia terenu), powoduje duże zróżnicowanie termiczne obszaru, a ono prowadzi do występowania lokalnych cyrkulacji powietrza i silnych turbulencji. Występuje tu intensywne mieszanie się powietrza, a także wymuszanie jego ruchu ku górze. Powszechnym zjawiskiem są również fale górskie, które jednak mają znikomą wpływ na konwekcję, gdyż występują przy stałej stratyfikacji termicznej w troposferze. Karpaty stanowią też wyraźną barierę orograficzną dla mas powietrza przemieszczających się z północy i południa. Wszystkie te elementy sprzyjają rozwojowi konwekcji, częstszemu i intensywniejszemu niż na nizinach. Częstość burz osiąga tu na ogół 34 dni w roku

(Atlas... 2005), a miejscami w Beskidzie Niskim i Bieszczadach - nawet 35–37 dni (Ustrnul i in. 2014). Z powyższych powodów, poznanie uwarunkowań konwekcji na tym obszarze jest ciekawe oraz może mieć wartość aplikacyjną.

Dane i metody badań

W badaniach wykorzystano wskaźnik konwekcji CAPE. Jest to termodynamiczny wskaźnik informujący o maksymalnej ilości energii kinetycznej mogącej oddziaływać na porcję powietrza w warunkach równowagi chwiejnej. Innymi słowy jest to miara wyporności oddziałująca na objętość powietrza w określonych warunkach termiczno-wilgotnościowych. CAPE jest obecnie najczęściej stosowanym w literaturze, a także pracy operacyjnej, wskaźnikiem konwekcji.

Badania dotyczą jedynie lata (czerwiec–sierpień), gdyż jest to pora roku, podczas której konwekcja jest najintensywniejsza, przez co wielkość wskaźnika CAPE jest najbardziej zróżnicowana.

Wielkości wskaźnika CAPE pochodziły z reanaliz meteorologicznych bazy ECMWF (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) oraz z pomiarów aerologicznych wykonanych w Popradzie. Reanalizy meteorologiczne powstają w wyniku asymilacji różnorodnych pomiarów atmosfery, zarówno *in situ*, jak też uzyskiwanych za pomocą technik teledetekcyjnych, z użyciem modeli meteorologicznych (Szot i Kosowski, 2014). Wykorzystane reanalizy cechują się dobrą rozdzielczością przestrzenną wynoszącą $0,125^{\circ} \times 0,125^{\circ}$ długości i szerokości geograficznej. W każdym punkcie przecięcia tej siatki geograficznej znana jest wartość badanego wskaźnika. W pracy badano wartość CAPE z godziny 12 UTC.

Drugim wykorzystanym rodzajem danych były pomiary aerologiczne. Jest to jedyne źródło danych bezpośrednio informujące o warunkach termicznych i wilgotnościowych w pionowym profilu swobodnej atmosfery (Bąkowski 2005). Z uwagi na rozproszone rozmieszczenie stacji aerologicznych, jedynie stacja w Popradzie reprezentuje warunki meteorologiczne nad Karpatami Zachodnimi. Tak samo jak w przypadku reanaliz, obliczenia na podstawie danych aerologicznych odniesiono do godziny 12 UTC.

Przedstawione powyżej dane wyjściowe zestawiono z klasyfikacją typów cyrkulacji atmosferycznej – Grosswetterlagen oraz T. Niedźwiedzia. Klasyfikacja

T. Niedźwiedzia obejmuje 21 typów cyrkulacji: 8 typów cyrkulacji cyklonalnych, 8 antycyklonalnych, 4 bez wyraźnej adwekcji (Ka, Ca, Bc, Cc) oraz jednej sytuacji nieokreślonej (X; Niedźwiedź 1981, 2013). Klasyfikacja ta należy do subiektywnych (manualnych) i dotyczy skali regionalnej – dorzecza górnej Wisły. W pracy zastosowano ją dla obszaru Karpat Zachodnich, gdyż obszar jej wyznaczania pokrywa się z obszarem badań. Ponadto, klasyfikacja ta opracowywana jest na podstawie dolnych map synoptycznych oraz topografii barycznej poziomu 700 hPa, na której adwekcja powietrza jest niezaburzana przez Karpaty. Drugą zastosowaną klasyfikacją typów cyrkulacji atmosferycznej, która w przeciwieństwie do klasyfikacji T. Niedźwiedzia, ma na celu ukazanie warunków cyrkulacyjnych nad znaczną częścią Europy Środkowej, była klasyfikacja Grosswetterlagen. Zawiera ona 30 typów cyrkulacji: 4 typy cyrkulacji strefowej, 7 mieszanej, 18 południkowej oraz jeden typ nieokreślony lub przejściowy (Hess i Brezowsky 1952; Werner i Gerstengarbe 2010). W pracy uwzględniono jedynie te typy cyrkulacji, które wystąpiły przynajmniej 10 razy w badanym wieloleciu. Metoda ta pozwoliła odseparować zbyt wysokie wartości średnie związane z małą liczbą przypadków.

Ocena synoptyczna została dokonana w pierwszej kolejności przez interpolację metodą zwykłego krigingu wielkości wskaźnika CAPE z reanalizy bazy NCEP/NCAR, a następnie przez analizę średnich obszarowych (średniej wartości wskaźnika ze wszystkich punktów gridowych) względem rodzaju cyrkulacji atmosferycznej.

Wyniki

Na podstawie wartości wskaźnika CAPE szacowana jest wielkość niestabilności atmosfery (tab. 1). Przedstawione wartości szacunkowe odnoszą się głównie do obszaru USA, gdzie zakres zmienności wskaźnika CAPE jest większy niż w Europie. W Polsce słaba niestabilność atmosfery, określana jako przedział wartości wskaźnika CAPE 0-999 J/kg, może spowodować wystąpienie groźnych zjawisk konwekcyjnych. W badaniach zależności występowania burz od wielkości wskaźnika CAPE na terytorium Polski najczęściej stosowaną wartością progową jest 200–300 J/kg (Walawender i in., 2015; Malinowska, 2011). Najwięcej przypadków z CAPE powyżej tych wartości występuje latem. Wszystkie uzyskane wyniki odnoszą się więc do średnich obszarowych ze wszystkich punktów gridowych z miesięcy letnich.

W Karpatach Zachodnich, w lecie średnia wartość wskaźnika CAPE osiągała najniższe wartości na południowym zachodzie obszaru, natomiast najwyższe - we wschodniej części gór. W Beskidzie Niskim średnie wartości badanego wskaźnika w lecie przekraczały 230 J/kg (ryc. 1).

Na rycinie 2. przedstawiono średnie obszarowe wartości wskaźnika CAPE w danych typach cyrkulacji atmosferycznej Grosswetterlagen dla lata. Najwyższe średnie wartości badanego wskaźnika związane były z cyklonalną adwekcją powietrza z południa (SZ). Podczas tego typu cyrkulacji średnia wartość wskaźnika CAPE przekraczała 900 J/kg. Podczas zalegania niżu nad Europą Środkową (TM), bruzdy niskiego ciśnienia nad Europą Zachodnią (TRW) oraz przy cyklonalnej adwekcji powietrza związanej z układem wysokiego ciśnienia nad Morzem Północnym - Fennoskandią (HNFZ), wskaźnik CAPE spadał średnio poniżej 350 J/kg. CAPE o średnich wartościach około 300 J/kg występował przy cyklonalnej adwekcji powietrza z południowego zachodu (SWZ) oraz podczas zalegania układu niskiego ciśnienia nad Wyspami Brytyjskimi (TB).

W badanym wieloleciu najwyższe wartości wskaźnika CAPE - powyżej 3500 J/kg (ryc. 3), występowały podczas zalegania zatoki niskiego ciśnienia nad Europą Środkową (TM). Wartości poniżej 3000 J/kg związane były z cyklonalną adwekcją powietrza z południa (SZ), antycyklonalną adwekcją powietrza z południowego zachodu (SWZ) oraz występowaniem zatoki niskiego ciśnienia nad Europą Zachodnią (TRW).

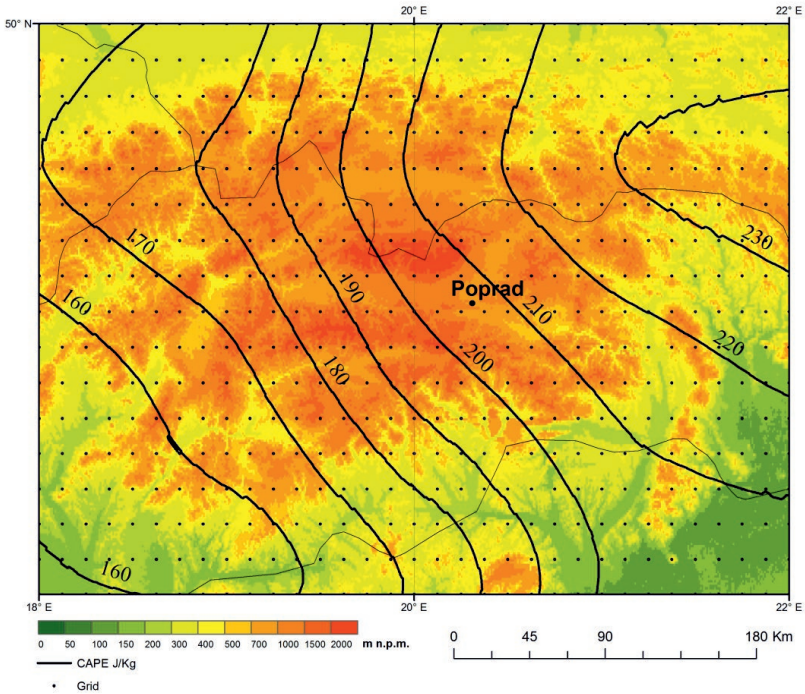
Zgodnie z przypuszczeniem, wg klasyfikacji T. Niedźwiedzia, cyklonalne typy cyrkulacji powodowały występowanie wyższych wartości wskaźnika CAPE niż typy antycyklonalne. Latem najwyższe średnie wartości wskaźnika CAPE występowały podczas sytuacji cyklonalnej z adwekcją powietrza ze wschodu (Ec), sytuacji antycyklonalnej z adwekcją z południowego wschodu (SEa), a także przy sytuacji

Tab. 1. Przedziały wartości wskaźnika CAPE (J/kg) i odpowiadający im poziom niestabilności atmosfery

Tab. 1. CAPE (J/kg) values and related atmospheric instability level

CAPE	Niestabilność atmosfery/ Atmospheric instability
0-999	słaba/weak
1000-2500	umiarkowana/moderate
2500-4000	silna/otrong
>4000	ekstremalna/extreme

Źródło/Source: Bąkowski 2005.



Ryc. 1. Średnia wartość wskaźnika CAPE (J/kg) w lecie (2000-2012), lokalizacja punktów gridowych i stacji aerologicznej w Popradzie na tle rzeźby terenu

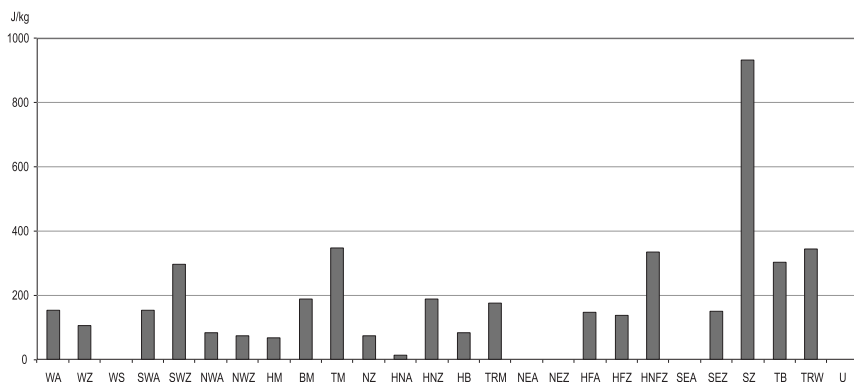
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 1. Average CAPE values (J/kg) in summer, localization of grid points and Poprad aerological station against relief

Source: author's own work.

cyklonalnej z adwekcją powietrza z południa (Sc) oraz z południowego wschodu (SEc). Wskaźnik CAPE w tych typach przekraczał 400 J/kg (ryc. 4). Wysokie wartości osiągające 350 J/kg występowały podczas zalegania bruzdy cyklonalnej (Bc). W typie Ca średnia wartość CAPE była najniższa - niewiele powyżej zera.

Najwyższe w badanym okresie wartości wskaźnika CAPE w lecie występowały kolejno w typie Sc, SEa oraz Bc. W tych typach cyrkulacji atmosferycznej wskaźnik CAPE przekraczał 3000 J/kg. Najwyższa wartość wskaźnika w całym okresie badań wystąpiła podczas typu Sc - powyżej 3700 J/kg (ryc. 5).

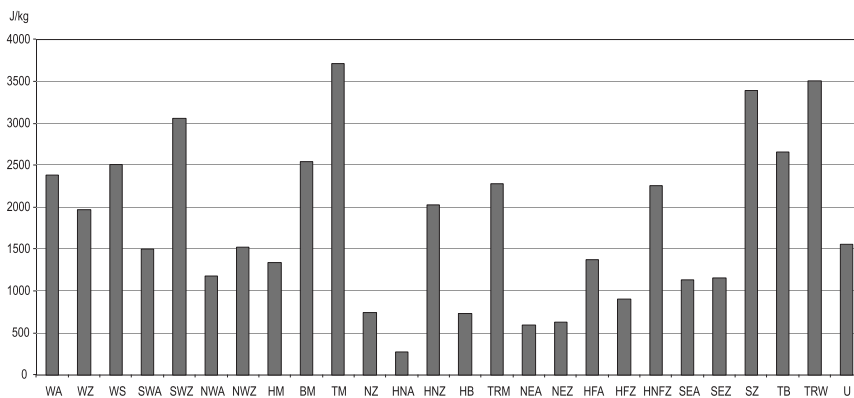


Ryc. 2. Średnie wartości wskaźnika CAPE w Karpatach Zachodnich w lecie o godzinie 12:00 UTC (2000–2012) w typach cyrkulacji atmosferycznej wg klasyfikacji Grosswetterlagen

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2. Average CAPE over the Western Carpathians values at 12 UTC (2000–2012) in circulation types according to Grosswetterlagen classification in summer

Source: author's own work.

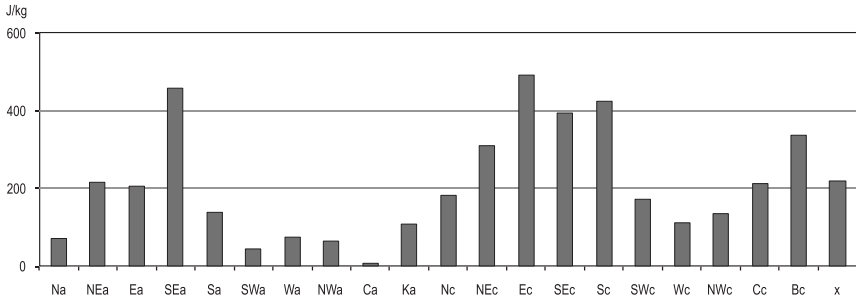


Ryc. 3. Maksymalne wartości wskaźnika CAPE w Karpatach Zachodnich w lecie o 12:00 UTC (2000–2012) w typach cyrkulacji atmosferycznej wg klasyfikacji Grosswetterlagen

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 3. The highest CAPE over the Western Carpathians values at 12:00 UTC (2000–2012) in circulation types according to Grosswetterlagen classification in summer

Source: author's own work.

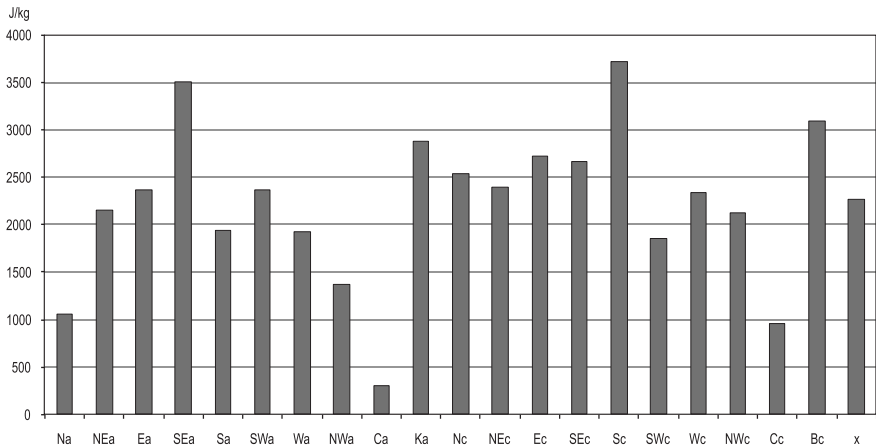


Ryc. 4. Średnie wartości wskaźnika CAPE w Karpatach Zachodnich w lecie o 12:00 UTC (2000–2012) w typach cyrkulacji atmosferycznej wg klasyfikacji T. Niedźwiedzia

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 4. Average CAPE over the Western Carpathians values at 12:00 UTC (2000–2012) in circulation types according to T. Niedźwiedź classification in summer

Source: author's own work.



Ryc. 5. Maksymalne wartości wskaźnika CAPE w Karpatach Zachodnich w lecie o 12:00 UTC (2000–2012) w typach cyrkulacji atmosferycznej wg klasyfikacji T. Niedźwiedzia

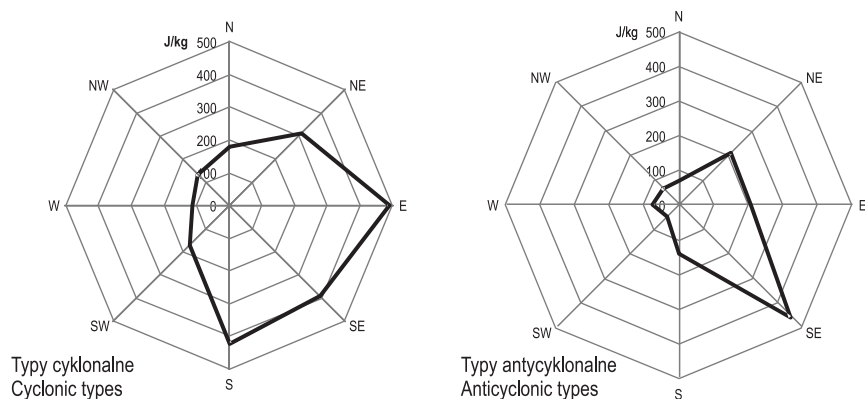
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 5. The highest CAPE over the Western Carpathians values at 12:00 UTC (2000–2012) in circulation types according to T. Niedźwiedź classification in summer

Source: author's own work.

Średnie wartości wskaźnika CAPE dla lata przedstawiono również na wykresie radarowym wyróżniając kierunek adwekcji powietrza (ryc. 6). W sytuacjach cyklonalnych najwyższe wartości wskaźnika CAPE wiązały się z adwekcją powietrza ze wschodu, południowego wschodu oraz południa, osiągając 400–500 J/kg. Wysokie wartości rzędu 300 J/kg występowały przy adwekcji powietrza z północnego wschodu. Adwekcja powietrza z pozostałych kierunków charakteryzowała się wartościami CAPE poniżej 200 J/kg. W sytuacjach antycyklonalnych zdecydowanie najwyższe wartości wskaźnika występowały przy adwekcji powietrza z południowego wschodu, osiągając średnio niemal 500 J/kg. Adwekcja powietrza ze wschodu oraz północnego wschodu charakteryzowała się wartościami dużo niższymi – średnio 200 J/kg.

Zarówno przy sytuacji cyklonalnej jak i antycyklonalnej, najwyższe wartości wskaźnika CAPE wiązały się z adwekcją powietrza z kierunków wschodnich i południowych, najniższe natomiast z kierunków zachodnich i północno-zachodnich.



Ryc. 6. Średnia wartość wskaźnika CAPE w Karpatach Zachodnich w lecie o 12:00 UTC (2000–2012) w adwekcyjnych typach cyrkulacji – cyklonalnych i antycyklonalnych zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia na podstawie reanaliz

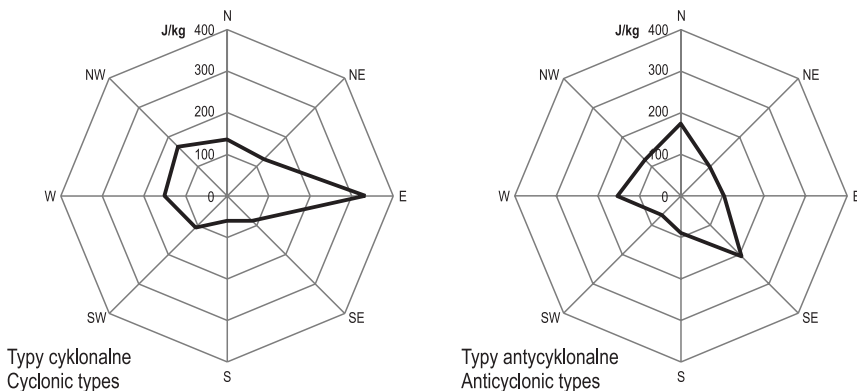
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 6. Average CAPE over the Western Carpathians values at 12:00 UTC (2000–2012) in specific direction of air advection in cyclonic and anticyclonic situations according to T. Niedźwiedź classification based on reanalysis

Source: author's own work.

Podobne analizy, jak powyżej, wykonano przy wykorzystaniu danych aerologicznych ze stacji w Popradzie. Obliczono średnią wartość wskaźnika CAPE w zależności od typu i kierunku adwekcji powietrza zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia. Wyniki wskazują, że najwyższe średnie wartości wskaźnika CAPE w lecie, w sytuacjach cyklonalnych związane były z adwekcją powietrza ze wschodu, natomiast w typach antycyklonalnych z adwekcją z kierunku południowo-wschodniego (ryc. 7). W sytuacjach cyklonalnych z adwekcją powietrza ze wschodu, wskaźnik CAPE średnio osiągał ponad 300 J/kg, a w przypadku kierunków zachodnich – około 100–150 J/kg. W sytuacjach antycyklonalnych wskaźnik CAPE dochodził do 200 J/kg przy adwekcji powietrza z południowego wschodu oraz do około 150 J/kg przy adwekcji powietrza z północy i zachodu. W sytuacjach cyklonalnych występowało większe zróżnicowanie wielkości badanego wskaźnika niż w antycyklonalnych.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że średnie wartości wskaźnika CAPE są silniej zróżnicowane w poszczególnych typach cyrkulacji niż jego wartości maksymalne. Dodatkowo, w przypadku klasyfikacji Grosswetterlagen widoczna



Ryc. 7. Średnia wartość wskaźnika CAPE na stacji w Popradzie w lecie o 12:00 UTC (2000–2012) w adwekcyjnych typach cyrkulacji – cyklonalnych i antycyklonalnych zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 7. Average CAPE values in Poprad aerological station in summer at 12:00 UTC (2000–2012) in specific direction of air advection in cyclonic and anticyclonic situations according to T. Niedźwiedź classification

Source: author's own work.

jest dominująca wartość średnia wskaźnika CAPE w typie SZ, podczas gdy w klasyfikacji T. Niedźwiedzia wysokie wartości średnie występują w kilku typach cyrkulacji. Porównując dane z reanaliz oraz dane aerologiczne ze stacji w Popradzie, stwierdzono, że wyższe średnie wartości CAPE charakterystyczne są dla re analiz, a niższe dla obserwacji aerologicznych w Popradzie. Mimo tych różnic, można stwierdzić, że obydwie źródła danych wskazują na podobne kierunki adwekcji powietrza powodujące występowanie najwyższych wartości wskaźnika CAPE.

Podsumowanie

Badania pozwoliły wstępnie poznać warunki sprzyjające występowaniu konwekcji w Karpatach Zachodnich, które - jak się okazało - są silnie zależne od typu cyrkulacji atmosferycznej. Zauważono różny wpływ typu cyrkulacji na wielkość badanego wskaźnika CAPE ze względu na zastosowaną klasyfikację. Wydaje się, że na podstawie klasyfikacji Grosswetterlagen łatwiej jest wyróżnić typ cyrkulacji najbardziej sprzyjający konwekcji, gdyż średnia wartość CAPE w typie SZ znacznie dominuje nad wartościami w pozostałych typach. Inaczej jest w przypadku klasyfikacji T. Niedźwiedzia, gdzie wysokie wartości badanego wskaźnika wiążą się z kilkoma typami cyrkulacji atmosferycznej, głównie z tymi z adwekcją powietrza ze wschodu, południowego wschodu i południa. Ponadto na podstawie badań wysunięto następujące wnioski.

Latem wskaźnik CAPE w Karpatach Zachodnich osiągał średnio od 160 J/kg, w południowo-wschodniej części obszaru, do ponad 230 J/kg, w rejonie Beskidu Niskiego i Bieszczadów. Zgodnie z klasyfikacją Grosswetterlagen najwyższe średnie wartości wskaźnika CAPE występowały podczas cyklonalnej adwekcji powietrza z południa (SZ), natomiast najwyższa w ciągu całego okresu wartość wskaźnika wystąpiła podczas zalegania niżu nad Europą Środkową (TM). Według klasyfikacji T. Niedźwiedzia najwyższe średnie wartości wskaźnika CAPE wiązały się z adwekcją cyklonalną powietrza ze wschodu (Ec) i południa (Sc), a także z adwekcją antycyklonalną powietrza z południowego wschodu (SEa). Stwierdzono również, że w badanym wieloleciu, zgodnie z obydwoma klasyfikacjami typów cyrkulacji, wyższe średnie wartości wskaźnika CAPE występowały w typach cyklonalnych niż antycyklonalnych.

Można więc stwierdzić, że warunki najbardziej sprzyjające konwekcji (określane na podstawie jedynie wskaźnika CAPE) w Karpatach Zachodnich, występują podczas adwekcji powietrza z południa, południowego wschodu i wschodu. Dodatkowo warunki te wiążą się z obecnością ośrodków niskiego ciśnienia i zatoki niskiego ciśnienia.

Wysokie wartości badanego wskaźnika, wiążące się z adwekcją powietrza z sektora wschodniego, mogą być wywoływane napływem gorącego i wilgotnego powietrza z nad Morza Czarnego, które niejednokrotnie przyczynia się do powstania powodzi, zwłaszcza w polskiej części Karpat (Matuszko, Piotrowicz 2012).

Uzyskane najwyższe średnie letnie wartości wskaźnika CAPE dla Beskidu Niskiego i Bieszczad, znajdują potwierdzenie w badaniach Waławender i in. (2015), według których najwyższe w skali Polski wartości wskaźnika CAPE występują w południowo-wschodniej Polsce.

Układ przestrzenny wskaźnika CAPE wykonany metodą interpolacji z użyciem zwykłego krigingu jest pewnym przybliżeniem. Metoda ta ma dużą użyteczność, lecz nie uwzględnia wielu czynników, takich jak wysokość bezwzględna, która wpływa na elementy meteorologiczne. Wydaje się, że metoda kokrigingu, która wykorzystuje dodatkową zmienną, dałaby dokładniejsze rezultaty, jednakże nie określono bezpośredniego wpływu wysokości bezwzględnej (jako dodatkowej zmiennej) na wskaźnik CAPE. Ponadto badany wskaźnik uwarunkowany jest wieloma różnymi elementami meteorologicznymi, które w obszarach górskich zmieniają się dynamicznie.

Wskaźnik CAPE świadczy o ilości energii, która potencjalnie może zostać wykorzystana w konwekcji, co nie zawsze przekłada się bezpośrednio na występowanie burz i zjawisk konwekcyjnych. Rozpatrywany wskaźnik jest parametrem określającym obszary, w których może zaistnieć konwekcja. Jednakże zdarza się, że pomimo wysokich wartości tego wskaźnika konwekcja nie występuje. Do prawidłowego prognozowania zjawisk konwekcyjnych należy stosować podejście kompleksowe, uwzględniając wiele innych elementów, takich jak: niedosyt wilgotności, gradient temperatury powietrza, obecność warstw hamujących przepływ powietrza, zmiany ciśnienia atmosferycznego, a także wielkoskalowe procesy dynamiczne na różnych poziomach troposfery. Warto też uwzględnić w tym celu inne stosowane wskaźniki konwekcji oraz poszukiwać nowych, które lepiej przedstawiają stan termodynamiczny atmosfery.

Literatura

- Atlas klimatu Polski*, 2005, H. Lorenc (red.), IMGW, Warszawa.
- Barry R. G., Carleton A. M., 2001, *Synoptic and dynamic climatology*, Routledge, London–New York.
- Barry R. G., Chorley R. J., 1998, *Atmosphere, weather and climate*, Routledge, London–New York.
- Barry R. G., Perry A. H., 1973, *Synoptic climatology, methods and applications*, Methuen, London.
- Bąkowski R., 2005, *Wybrane analityczne i prognostyczne wskaźniki chwiejności atmosfery* [w:] M. Ozga-Zielińska, D. Limanówka (red.), *Hydrologia, meteorologia, klimatologia – badania naukowe i prognozy w erze informatyzacji*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne – IMGW, Warszawa, 209–218.
- Bebłot G., Hołda I., Rorbek K., 2008, *Trąba powietrzna w rejonie Częstochowy w dniu 20 lipca 2007 roku* [w:] Maciejewski M., Ostojski M. S. (red.), *Ekstrema pogodowe w Polsce, obserwacje, pomiary, prognozy*, IMGW–PIB, Warszawa, 23–40.
- Bielec-Bąkowska Z., 2013, *Burze i grady w Polsce*, Prace Geograficzne IGiGP UJ, 132, 99–132.
- Bielec Z., 2000, *Przebieg dobowy i charakterystyka synoptyczna burz w Krakowie w latach 1896–1995*, Prace Geograficzne IGiGP UJ, 105, 73–83.
- Bielec-Bąkowska Z., 2002, *Zróżnicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce (1949–1998)*, Wyd. Uniw. Śląskiego, Katowice.
- Blanchard D. O., 1998, *Assessing the vertical distribution of convective available potential energy*, *Weather and Forecasting*, 13, 870–877.
- Brooks E. H., 2013, *Severe thunderstorms and climate change*, *Atmospheric Research*, 123, 129–138.
- Brooks E. H., Anderson A. R., Riemann K., Ebberts I., Flachs H., 2007, *Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP reanalysis*, *Atmospheric Research*, 83, 294–305.
- Brooks E. H., Lee W. J., Craven P. J., 2003, *The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data*, *Atmospheric Research*, 67–68, 73–94.
- Celiński-Mysław D., Matuszko D., 2014, *An analysis of the selected cases of derecho in Poland*, *Atmospheric Research*, 149, 263–281.

- Delden A., 2001, *The synoptic setting of thunderstorms in western Europe*, Atmospheric Research, 56, 89–110.
- Grabowska K., 2011, *Annual and daily changes of thunderstorms in temperate climate in London, Warsaw and Moscow*, Miscellanea Geographica, 15, 115–122.
- Grünwald S., Brooks E. H., 2011, *Relationship between sounding derived parameters and the strength of tornadoes in Europe and the USA from reanalysis data*, Atmospheric Research, 100, 497–488.
- Hess P., Brezowsky H., 1952, *Katalog der Grosswetterlagen Europas*, Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 33.
- Holley D. M., Dorling R., Steele C. J., Earl N., 2014, *A climatology of convective available potential energy in Great Britain*, International Journal of Climatology, 34, 3811–3824.
- Kolendowicz L., 1996, *Burze na obszarze Polski Północno-Zachodniej w świetle częstości występowania różnych typów cyrkulacji atmosfery*, Zeszyty IGI-PZ PAN, 39, 1–115.
- Kolendowicz L., 2006, *The influence of synoptic situations on the occurrence of days with thunderstorms during a year in the territory of Poland*, International Journal of Climatology, 26, 1803–1820.
- Kolendowicz L., 2007, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie dni z burzą w Polsce w latach 1971–2000* [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGI-PZ UJ, Kraków, 103–109.
- Malinowska M., 2011, *Variability of chosen instability indices in Poland in XXI century*, Prace i Studia Geograficzne, 47, 97–107.
- Matuszko D., Piotrowicz K., 2012, *Ekstremalne zdarzenia pogodowe w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne* [w:] Z. Bielec-Bąkowska, E. Łupikaszka, A. Widawski (red.), *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Uniw. Śląski Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec, 211–218.
- Niedźwiedz T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, Wyd. UJ, Kraków.
- Niedźwiedz T., 2013, *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej – zbiór komputerowy*, Uniw. Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Peppier R. A., 1988, *A review of static stability indices and related thermodynamic parameters*, Climate and Meteorology Section, Champaign.

- Popławska J., Grabowska K., 2013, *The methods for detection of tornadoes in Poland (case study)*, Scientific Annals of „Alexandru Ioan Cuza” University of Iasi – Geography series, 59, 2, 31–47.
- Rozbicka K., Majewski G., Rozbicki T., 2009, *Charakterystyka stanów równowagi atmosfery na stacji miejskiej Ursynów SGGW i stacji podmiejskiej Legionowo*, Acta Agrophysica, 13(2), 473–485.
- Siedlecki M., 2011, *Charakterystyka klimatologiczna chwiejności atmosfery nad Europą*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, Łódź, 11, 1–204.
- Siedlecki M., Rzepa M., 2008, *Charakterystyka całkowitej energii chwiejności atmosfery nad Europą w latach 1991–2003*, Przegląd Geofizyczny, 53(1), 43–54.
- Słownik meteorologiczny, 2003, T. Niedźwiedz (red.), Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW, Warszawa.
- Suwała K., 2014, *Synoptyczne uwarunkowania występowania opadów gradu w Środkowej Europie*, Rozprawa doktorska, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniw. A. Mickiewicza w Poznaniu.
- Szot S., Kosowski M., 2014, *Porównanie danych uzyskanych z radiosondaży z danymi wyznaczonymi na podstawie reanalizy NCEP-NCAR*, Prace Geograficzne IGiGP UJ, 136, 31–44.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2009, *Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce*, IMGW-PIB, Warszawa.
- Ustrnul Z., Wypych A., Henek E., Czekierda D., Walawender J., Kubacka D., Pyrc R., Czernecki B., 2014, *Atlas zagrożeń meteorologicznych Polski*, Wyd. Attyka, Kraków.
- Walawender E., Kielar R., Ustrnul Z., 2015, *Use of RegCM gridded dataset for thunderstorm favorable conditions analysis over Poland–climatological approach*, Theoretical and Applied Climatology, 127 (1–2), 229–240 .
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., 2010, *PIK Report, Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881–2009)*, Potsdam, Germany.

